

ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертацію Зикова Олександра Володимировича „Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітними полями”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.08 „Фізика плазми”

Докторська дисертація О.В. Зикова присвячена проблемі визначення і узагальнення фізичних закономірностей процесів генерації та транспортування іонних потоків у плазмових системах із комбінованими ЕН полями на основі фундаментальних положень фізики газового розряду та низькотемпературної плазми.

Даний напрямок досліджень є досить актуальним, оскільки на основі методів йонно-плазмових технологій можуть бути створені принципово нові та вдосконалені існуючі технологічні процеси зміцнення поверхневих шарів матеріалів, очищення, активації та полірування поверхні, нанесення складнокомпозиційних функціональних покриттів, прецизійного травлення у виробництві приладів мікро- і наноелектроніки. Для розв'язку задачі автор використав методи експериментальних і теоретичних досліджень процесів генерації та транспортування йонних потоків у газорозрядних плазмових системах різного типу з комбінованими електричними і магнітними полями, а саме: у планарному магнетронному розряді (ПМР) в прискорювальному і плазмовому режимах, ВЧ-індукційному (ВЧІ) розряді, а також у комбінованих ВЧ індукційно-ємнісному (ВЧІЄ) і ВЧ індукційно-магнетронному (ВЧІМ) розрядах.

Робота складається зі вступу, семи розділів, висновків по роботі та списку використаних джерел з 265 найменувань. Повний об'єм дисертації складає 312 сторінок друкованого тексту, включаючи 184 рисунки. Наукова термінологія, що застосована у роботі, є загально визнаною, стиль викладання результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій є цілком професійним.

У **першому** розділі розглянуті питання виникнення газового розряду в пристроях з постійними схрещеними ЕН полями. Для вивчення процесів утворення газорозрядної плазми в таких полях, формування і транспортування йонних потоків в якості базового об'єкту досліджень використано серійне джерело йонів «Радикал» типу прискорювача з анодним шаром. Експериментально були визначені основні характеристики розряду для двох характерних випадків: 1) без сітки на катодній межі, коли вакуумне електричне поле є неоднорідним; 2) за наявності сітки на внутрішній поверхні катода, коли це поле є однорідним. Феноменологічна модель виникнення планарного магнетронного розряду (ПМР) розглядає існування в розрядному проміжку двох груп електронів: електронів, що народилися в розрядному проміжку з невеликими початковими швидкостями (s -електронів), і електронів з великими початковими швидкостями, які інжектуються в розрядний проміжок уздовж силових ліній магнітного поля в результаті вторинної іон-електронної емісії (γ -електрони). Частина γ -електронів захоплюється в електромагнітну пастку внаслідок парних зіткнень і колективних процесів і утворює групу осцилюючих, так званих os -електронів. З урахуванням цих факторів, на основі класичної теорії Таунсенда електричного пробоя вакуумного діода, адаптованої до умов магнітного поля, отримано рівняння пробоя розряду для випадків сильного (якому відповідають s -електрони) і слабого (os -електрони) однорідних електричних полів, а також для

неоднорідного електричного поля. Ця теорія задовільно відповідає результатам експериментальних вимірювань.

У **другому** розділі дисертації описані результати досліджень прискорювального режиму ПМР, в якому генеруються йони з енергією $\varepsilon_i = (1-3)$ кеВ. Їм передує огляд літератури з питань формування прианодного електронного шару в схрещених ЕН полях у характерному для цього режиму низькому тиску робочого газу $p < 1$ мТорр у газорозрядних пристроях з різною геометрією електродів (розряд Пеннінга, циліндричний обернений магнетрон, прискорювач з анодним шаром). Наголошено, що в проведених раніше дослідженнях недостатньо враховувалось існування перехідної області – передшару зі слабким електричним полем.

Основним результатом цих досліджень стало визначення тонкої структури розрядного проміжку ПМР, в якій можна виділити три характерні області:

1. *Прианодний шар* з сильним електричним полем $E > 100 - 200$ В/см, в якому відбувається розвиток електронних лавин, а ФРЕЕ істотно відрізняється від максвеллової.

2. Проміжна область – *передшар* з електричним полем $E < 100 - 200$ В/см, де в електронів існує локально-рівноважна ФРЕЕ, близька до максвеллової з характерною величиною електронної температури $T_e = (3-15)$ еВ. Із зменшенням відстані до анода температура електронів і потенціал плазми монотонно збільшуються.

3. Область *йонно-пучкової плазми* (ППП) із слабким електричним полем $E < 10$ В/см. У цій області електронна температура $T_e = (1-3)$ еВ.

У цьому ж розділі представлена схема прецизійних зондових вимірювань. Проте вона описана дуже стисло, що є безумовним недоліком роботи (незалежно від того, чи є дисертант автором цих методик), оскільки не дозволяє кваліфіковано оцінювати, зокрема, похибки вимірювань. Особливо це стосується техніки вимірювань термозондом, який доволі рідко використовується в практиці плазмового експерименту і навіть досвідченим спеціалістам важко „відчувати” точність вимірювання ним, наприклад, плаваючого потенціалу плазми.

У цьому ж розділі представлена дрейфова теорія стаціонарних станів ПМР у прискорювальному режимі для вдосконаленої феноменологічної моделі з урахуванням згаданої вище тонкої структури розрядного проміжку. Вона добре відповідає результатам проведених у роботі експериментальних досліджень.

У **третьому** розділі дисертації розглянуто плазмовий режим ПМР, в якому генеруються йони з енергією $\varepsilon_i = (0,5-1)$ кеВ.

Дослідження проводилося на установці, основу якої складав магнетрон із змінною геометрією силових ліній магнітного поля. Його магнітна система складалася із зовнішнього соленоїда, струм якого змінювався в межах $I_c = (0 - 10)$ А і центральних постійних магнітів. Для пояснення вольт-амперної характеристики і мінімального тиску існування магнетронного розряду p_{ign} продуктивною виявилася ідея щодо існування іонізаційної пастки, максимальна висота якої визначається висотою арок магнітних силових ліній, які йдуть на катод. Згідно з нею розроблено просторово-усереднену модель ПМР, яка враховує існування в плазмі двох груп електронів з різними ФРЕЕ: первинних високоенергетичних *os*-електронів, захоплених в електромагнітну пастку з моноенергетичною ФРЕЕ, і групи вторинних плазмових електронів з максвелловою ФРЕЕ.

На основі експериментальних і теоретичних досліджень зроблені такі основні висновки про механізм планарного магнетронного розряду в плазмовому режимі:

1. Для ПМР параметром подібності є $pd_i \sim n_a d_i$, де d_i – характерний розмір іонізаційної пастки, n_a – концентрація робочого газу. Максимальне значення d_i відповідає максимальній висоті арок силових ліній магнітного поля, що спираються на катод.

2. Параметри $n_a d_i$ і $\delta = n_{os} / n_i$, що відповідає відносній частці os -електронів у плазмі, визначають рівноважну температуру електронів і границю існування плазмового режиму магнетронного розряду, а також поріг згасання по тиску робочого газу.

3. Температура електронів і параметр $n_a d$ визначають співвідношення струмів йонів, що народилися в результаті іонізації os - і p -електронами, і сумарну енергетичну ціну іона η_Σ .

У цьому розділі найбільшою мірою проявляється недолік оформлення дисертаційної роботи, пов'язаний з відсутністю переліку скорочень. Наприклад, знайти в дисертації чи авторефераті строге пояснення, що таке „ p -електрони”, доволі складно.

У **четвертому** розділі дисертації наведені результати досліджень процесу генерації потоку низькоенергетичних йонів у ВЧ індукційному розряді. Тут основними експериментальними пристроями були:

- циліндричний ВЧ розряд із зовнішнім кільцевим індуктором;
- планарний плазмохімічний реактор на базі ВЧ розряду з торцевим спіральним індуктором;
- ВЧ джерело низькоенергетичних йонів з внутрішнім індуктором.

Для кожного з них були визначені такі інтегральні характеристики ВЧ розряду: залежності порогу запалювання від тиску робочого газу p_{min} , ватт-амперні характеристики і радіальні розподіли густини струму йонів j_i , температури електронів і потенціалу плазми залежно від параметрів системи.

Для опису ВЧ розряду при високому тиску і визначення границі застосовності просторово усередненої моделі було розроблено двомірну гідродинамічну модель, що ґрунтується на чисельному розв'язанні рівнянь амбіполярної дифузії, теплообміну і рівнянь для електромагнітного поля. Це дало можливість оцінити достовірність розрахунків за допомогою “глобальної” і двомірної гідродинамічної моделі.

З порівняння результатів теоретичних досліджень з експериментальними даними впливають такі висновки:

1. Поріг запалювання ВЧ розряду визначається мінімальним значенням параметра $(n_a d_{eff}) \sim (pd)_{min}$, вище якого системі властива рівноважна температура електронів.

2. Мінімальне значення $(pd)_{min}$ залежить від максимальної швидкості реакції іонізації K_0 робочого газу даного сорту.

3. Основними чинниками, що впливають на просторову однорідність потоку йонів, є тиск і сорт робочого газу, геометрія ГРК і місце розташування індуктора.

4. Збільшення тиску понад $pd > 20$ мТорр·см призводить до істотної просторової неоднорідності плазми і густини струму йонів, обумовленої зменшенням довжини релаксації енергії електронів і збільшенням градієнта електронної температури. Це обмежує застосування просторово-усередненої моделі при зростанні тиску робочого газу.

Основним недоліком цього розділу, як і другого, є надто стислий опис методики вимірювань (незалежно від того, чи є дисертант її автором), оскільки не дозволяє кваліфіковано оцінювати, зокрема, похибки вимірювань. Наприклад, істотний елемент

схеми зондових вимірювань – ВЧ-фільтр, лише позначений на рис. 4.1, а щодо його властивостей, чи впливу на точність вимірювань у роботі взагалі не йдеться.

У **п'ятому** розділі дисертації йдеться про управління параметрами потоку іонів у комбінованих ВЧ індукційно-ємнісному (ВЧІЄ) та індукційно-магнетронному (ВЧІМ) розрядах, які стали основою для розробки комплексу плазмових технологічних модулів. Наголошено, що електромагнітний спосіб передачі енергії в плазму індукційного розряду відкриває можливість використовувати потенційне електричне поле – постійне, високочастотне, імпульсне, для управління енергією потоку йонів на задану поверхню, забезпечуючи незалежне управління густиною струму іонів.

Виявлено, що суттєвою особливістю ВЧІЄ розряду є зниження сумарної енергетичної ціни іона при подачі ВЧ потенціалу на електроди системи залежно від співвідношення площ електродів $\delta = S_2/S_1$. Така асиметрія площ ВЧ електродів має принципове значення в енергобалансі комбінованого ВЧІЄ розряду і впливає на величину сумарної енергетичної ціни іона та на енергетичну ефективність плазмових реакторів і джерел йонів на базі комбінованого ВЧІЄ розряду.

Додаткову інформацію про вплив вторинної іон-електронної емісії з поверхні електродів на характеристики і енергетичний баланс ВЧІ розряду дали дослідження комбінованого ВЧ індукційно-магнетронного розряду (ВЧІМ). Наявність електромагнітної пастки в області потенційного електроду дає можливість істотно збільшити густину іонного струму на цей електрод за рахунок використання енергії вторинних γ -електронів для іонізації робочого газу.

Для пояснення експериментальних даних було розроблено модель енергобалансу ВЧІМ розряду, основою якої є просторово усереднена модель ВЧ індукційного розряду. Її доповнено припущенням, що іонізація робочого газу здійснюється плазмовими електронами, які отримують енергію від двох джерел: ВЧ-генератора та γ -електронів, прискорених у катодному шарі.

У **шостому** розділі досліджені особливості зарядової і струмової нейтралізації низькоенергетичних іонних пучків у йонно-плазмових системах (ІПС). Актуальність дослідження цієї проблеми визначається тим, що йонно-пучкова плазма (ІПП), яка утворюється в просторі транспортування потоку йонів, забезпечуючи зарядову і струмову компенсацію пучка, є до того ж активним середовищем, з якого на оброблювану поверхню потрапляють заряджені, збуджені, хімічно активні частинки і електромагнітне випромінювання.

Експериментальні дослідження цього розділу проведені в основному на установці з серійним багатоканальним джерелом йонів холлівського типу „Радикал-М”. Вони включали детальні зондові вимірювання за допомогою плоского, циліндричного та багатосітчастого зондів. Показано, зокрема, що характерною рисою ФРЕЕ є наявність трьох груп електронів: низькотемпературного максвеллового ядра з температурою $T_e = 0.2 - 0.5$ eВ і густиною n_e , яка практично співпадає з густиною n_b пучка йонів $n_e \approx n_b \approx 10^8$ см⁻³; групи γ -електронів, енергія яких перевищує $e\phi_{pl}$ на величину початкової енергії γ -електронів $\sim (2-5)$ eВ, а густина складає $\sim 10^5$ см⁻³; "проміжної" немаксвеллової групи, густина і форма якої може мінятися в широких межах.

Аналіз показав, що сукупність процесів у йонно-пучковій плазмі можна охарактеризувати як несамостійний безелектродний газовий розряд низького тиску. Його визначальною особливістю є наявність зовнішнього високоенергетичного пучка йонів, який забезпечує інтенсивну вторинну йон-електронну емісію з поверхні мішені і, відповідно, низькі значення потенціалу плазми $\phi_{pl} \sim I$; відповідно, величина ϕ_{pl} та решта всіх параметрів ППД надзвичайно чутливі до емісійних характеристик матеріалу мішені та витоку плазмових електронів.

Сьомий розділ дисертації визначає загальні закономірності та відмінності йонно-плазмових систем із різними комбінаціями ЕН полів на основі порівняння оригінальних моделей ППС, представлених у попередніх розділах дисертаційної роботи. Найбільш універсальною характеристикою для порівняння всіх типів розглянутих ППС стала сумарна енергетична ціна йона η . Ця величина включає як сумарні пружні та непружні втрати енергії електрона ε_c , що супроводжують один акт іонізації при парних зіткненнях електрона з атомами, так і кінетичну енергію ε_k заряджених частинок: $\eta = \varepsilon_c + \varepsilon_k$. Втрати ε_c визначаються виглядом ФРЕЕ, а ε_k залежить від просторового розподілу потенціалу і відрізняється для різних типів розрядів.

На підставі проведеного аналізу зроблені висновки, що потенціал іонізації I та мінімальна довжина іонізації l_m (мінімальна довжина, на якій електрон набирає енергію eI) є загальними параметрами нормування енергії та простору для всіх моделей; сумарна, нормована енергетична ціна йона η/eI і величина d/l_m є енергетичними і просторовими параметрами подібності; для ППС без магнітного поля $d/l_m \sim pd$, а за наявності магнітного поля і класичної провідності електронів $d/l_m \sim Hd$. Побудовано також узагальнюючу діаграму існування різних режимів ПМР залежно від температури електронів, тиску робочого газу і геометричних розмірів, а на основі аналізу розроблених просторово усереднених моделей розрядів – побудовано узагальнені вольт-амперні характеристики ППС. Як висновок до цього розділу, дрейфові одновимірні моделі ППС дають можливість отримати аналітичні розв'язки рівнянь балансу частинок і енергій і проаналізувати фізичні механізми формування кривих запалювання і основних характеристик розряду. У низці випадків вони дають не лише якісну, але й кількісну відповідність експериментальним даним.

У **цілому** дисертація має чітку структуру. Результати, що отримані у кожному розділі, є елементами загальної „мозаїки” дисертаційної роботи, а далі вони узагальнюються у заключному розділі, забезпечуючи логічну цілісність дисертаційної роботи.

При загальній високій оцінці змістовної частини дисертаційної роботи опонент вважає за необхідне відмітити також майже бездоганний рівень оформлення дисертації та автореферату, які не вимагають особливих зауважень. Хіба що в тексті дисертації є окремі описки (наприклад, „кВ” замість „эВ” на рис. 6.9, чи двічі цитується посилання [232] = [262]), а щодо автореферату основним зауваженням є використання слова „іон” замість „йон”.

До основного недоліку роботи, з точки зору опонента, слід віднести методичний, який полягає у відсутності бодай загальної інформації щодо особливостей зондових методик діагностики плазми, які широко використовуються в роботі практично у всіх їх варіантах – тим більше, що вони застосовуються в умовах високочастотних полів; варто

було передбачити для цього невеликий оглядовий (під)розділ. Це зауваження можна доповнити також недоліком, пов'язаним з відсутністю загального переліку позначень у роботі, що ускладнює сприйняття читачем дисертації.

Проте ці зауваження не нівелюють позитивного сприйняття цілісної за своїм характером дисертаційної роботи, в якій автор зумів вилучити максимум можливої інформації з дуже складних об'єктів дослідження, інтерпретувати її та запропонувати цілісну картину взаємопов'язаних процесів у цих об'єктах.

Вважаю, що за актуальністю розглянутих задач, об'ємом досліджень, науковим рівнем і практичною цінністю отриманих результатів дисертаційна робота „Генерація і транспортування іонних потоків в плазмових системах з комбінованими електричними і магнітними полями” повністю відповідає спеціальності 01.04.08. – «Фізика плазми» та вимогам до докторських робіт, а її автор, Зиков Олександр Володимирович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за цією спеціальністю.

9 січня 2016 р.

Офіційний опонент
Заступник директора з наукової роботи,
завідувач відділу плазмових технологій
Інституту газу НАН України,
член-кореспондент НАН України
доктор фіз.-мат. наук



В.А. Жовтянський